

На правах рукописи

**Пьянков Сергей Васильевич**

**МАТЕМАТИКО-КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОСИСТЕМ И  
КОМПЛЕКСОВ (НА ПРИМЕРЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ)**

Специальность 25.00.36 – Геоэкология

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора географических наук

Казань – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Научный консультант: доктор географических наук, профессор  
**Калинин Николай Александрович**

Официальные оппоненты: **Погорелов Анатолий Валерьевич**  
доктор географических наук, профессор,  
заведующий кафедрой геоинформатики  
Кубанского государственного университета

**Стурман Владимир Ицхакович**  
доктор географических наук, профессор,  
заведующий кафедрой природопользования и  
экологического картографирования  
Удмуртского государственного университета

**Тикунов Владимир Сергеевич**  
доктор географических наук, профессор,  
заведующий лабораторией комплексного  
картографирования и заведующий  
региональным центром мировой системы  
данных географического факультета  
Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Российский государственный  
гидрометеорологический университет»  
(г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится 11 апреля 2013 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.081.20 в Казанском (Приволжском) федеральном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, корп. 2, Институт экологии и географии, ауд. 1211

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
к.г.н., доцент

Ю.Г. Хабутдинов

## Общая характеристика работы

**Актуальность исследования.** В настоящее время становится традиционным использование методов комплексной обработки пространственной информации при проведении геоэкологических исследований. Как правило, это связано с применением геоинформационных технологий (ГИС-технологий), которые обладают большими возможностями анализа, комплексирования, моделирования и отражения исследуемых объектов и явлений по сравнению с традиционными способами.

Математико-картографическое моделирование, создание картографических и тематических баз данных, разработка и внедрение географических информационных систем (ГИС) различного иерархического уровня и территориального охвата невозможно без использования современных технологических решений. Их применение позволило вывести комплексное решение пространственных задач на качественно иной уровень. Это нашло свое отражение в работах: С.Н. Сербенюка, В.Г. Линник, А.В. Кошкарева, В.С. Тикунова, А.М. Берлянта, И.К. Лурье, В.И. Стурмана, С.Г. Яковченко, В.А. Жорова и др.

Сущность геоинформационных технологий и связанных с ними методов математико-картографического моделирования состоит в том, что с их помощью производится сбор и создание баз данных, ввод их в компьютерные системы, хранение, обработка и преобразование полученной информации с целью формирования возможных решений различных задач (чаще всего в картографической форме, либо в виде таблиц, графиков, текстов).

Проведение современных геоэкологических исследований невозможно без использования картографических материалов, которые особенно актуальны при комплексном подходе изучаемых проблем, в частности, при оценке водных ресурсов, определении гидрографических и морфометрических характеристик, пространственно-временного распределения гидрологических процессов и явлений.

Для определения основных гидрографических показателей водных объектов и их бассейнов, морфометрических характеристик озер и водохранилищ, визуальной оценки исследуемой территории используются топографические и тематические карты различных назначений и масштабов. Внедрение геоинформационных систем и технологий позволяет не только облегчить и автоматизировать работу, но и существенно расширить использование карт, которые содержат большой объем информации, необходимой для анализа гидрологического режима водных объектов. В этой связи использование ГИС для выполнения геоэкологических исследований является не только актуальным, но и перспективным.

Важно отметить необходимость современного развития методов математико-картографического моделирования геоэкологических процессов и явлений. В частности, методы непараметрического вероятностно-статистического подхода позволяют получить формальные выводы о наступлении существенных качественных изменений состояния водохранилищ, вызванных пониже-

нием его уровня. Применение математических моделей, оценка их параметров и функций распределения позволяют выполнить качественную классификацию объектов исследования, например, участков водохранилищ в зависимости от изменения их морфометрических особенностей при понижении уровня воды.

Важной проблемой является точность определения гидрографических и морфометрических характеристик водных объектов, напрямую связанная с особенностями создания цифровой модели местности и рельефа дна, в том числе с учетом перемещения зоны переменного подпора, площади обнажения и оценки объема донных отложений.

**Объект исследования** – региональные гидрологические геосистемы и комплексы.

**Предмет исследования** – теоретические принципы, методы и практические приемы обработки геоэкологической информации для создания математико-картографических моделей геосистем и комплексов (на примере гидрологических).

**Целью диссертационного исследования** является разработка методов математико-картографического моделирования геосистем и комплексов регионального уровня (на примере гидрологических).

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- обобщить и углубить теоретико-методологические вопросы создания и использования региональных гидрологических геоинформационных систем для решения геоэкологических задач;

- разработать методы и практические способы обработки и пространственного анализа геоэкологической информации, представленной на картографической основе;

- создать программные модули по математико-картографической обработке геоэкологической, гидрографической и гидрологической информации;

- выявить средствами ГИС-технологий пространственно-временные отношения между тематическими характеристиками геосистем и комплексов (на примере гидрологических).

**Методы исследования, использованные в работе.** Теоретические методы исследования включают в себя системный анализ, математико-картографическое моделирование, геоинформационное картографирование, математическую статистику, а также машинное компьютерное моделирование и графику. Экспериментальные методы исследования заключались в проверке соответствия различных результатов математико-картографических моделей эмпирическим данным, статистической обработке полученных результатов, сравнении прогнозов с реальными изменениями исследуемых геосистем и комплексов.

**Информационную базу** составили следующие материалы:

- цифровые векторные карты (М 1:1000000, М 1:200000) (Роскартография РФ);
- растровые карты (М 1:1000000, М 1:200000, М 1:10000);

- «Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши». Т. 1. Вып. 25. Бассейн реки Камы. Л., 1988;

- «Ресурсы поверхностных вод. Гидрологическая изученность». Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 1. Кама;

- космические снимки территории Урала;

- тематические карты на территорию Пермского края и водосбора Воткинского водохранилища.

**Личный вклад.** Автором самостоятельно сформулированы цель и задачи диссертации, составлен план и программа исследования, выбраны и обоснованы методы исследования. Диссертант лично выполнил математическую и картографическую обработку пространственных и тематических данных, создал алгоритмы их обработки и реализовал программные модули, произвел анализ и обобщение полученных результатов. Подготовка к печати научных работ, отражающих результаты исследований, осуществлялась как самостоятельно, так и при участии соавторов.

**Научная новизна.**

- разработаны научно-обоснованные методы функционирования региональных гидрологических геоинформационных систем, направленных на решение геоэкологических задач;

- предложены новые методы математико-картографического моделирования, используемые при пространственном анализе геоэкологических процессов и явлений (на примере гидрологических);

- создана методика использования ГИС-технологий для исследования пространственных связей характеристик стока с его основными определяющими факторами;

- на основе геоинформационных технологий предложены методики определения и уточнения гидрографических, гидрологических характеристик рек, их бассейнов, а также морфометрических характеристик водохранилищ;

- впервые рассчитан ряд гидрографических и морфометрических характеристик гидрологических объектов территории бассейна Воткинского водохранилища.

**На защиту выносятся следующие положения:**

- теоретико-методологические основы создания и использования региональных гидрологических геоинформационных систем для решения геоэкологических задач;

- новые методы и практические способы обработки и пространственного анализа геоэкологической информации, представленной на картографической основе;

- программные модули по математико-картографической обработке геоэкологической, гидрографической и гидрологической информации;

- пространственно-временные отношения между тематическими характеристиками геосистем и комплексов (на примере гидрологических), выявленные средствами ГИС-технологий.

### **Практическая значимость работы.**

Результаты исследований используются в работе Министерства природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии, Министерства общественной безопасности, Министерства сельского хозяйства Пермского края, органов ГО и ЧС Пермского края, научных и проектных организациях:

- Научно-техническое обоснование и разработка программы «Предупреждение вредного воздействия вод и обеспечение безопасности ГТС на территории Пермского края» (2006 г.) (Краевая целевая программа принята законодательным собранием Пермского края в январе 2007 г.);

- «Информационное обеспечение органов государственной власти, органов местного самоуправления при принятии решений по обеспечению безопасности населения, предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера муниципальных образований Пермского края» (2007–2010 гг.);

- «Районирование территории Пермской области по степени риска возникновения чрезвычайных ситуаций природного и природно-техногенного характера с экологическими последствиями: районирование территории; создание банка данных для геоинформационной системы органов государственной власти (ГИС ОГВ)» (2002–2007 гг.),

- «Организация и проведение космического мониторинга прохождения паводка на территории Пермского края» (2007–2012 гг.).

Разработанные методы математико-картографического моделирования региональных гидрологических геосистем нашли свое отражение в следующих грантах Российского фонда фундаментальных исследований и Федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы:

- «Гидрологическая ГИС (на примере бассейна Воткинского водохранилища)», № 02-07-90225-в;

- «Исследование гидрологического режима крупных водохранилищ с использованием геоинформационных технологий (на примере камских)», № 04-05-96051-р2004урал\_а;

- «Гидрологическая ГИС водохранилищ (на примере камского каскада)», № 04-07-96007-р2004урал\_в;

- «Анализ формирования пространственно-временной динамики зимнего стока рек в среде ГИС методами математико-картографического моделирования», № 07-05-01077-а;

- «Технология комплексной оценки фитомассы сельскохозяйственных культур по данным дистанционного зондирования Земли», № 09-05-99027-р\_офи;

- «Организация и проведение Международной конференции «ИнтерКарто-ИнтерГИС – 15»: Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт», № 09-05-06042-г;

- «Комплексный подход в исследовании динамики процессов снеготаяния на водосборах рек», № 11-05-96026-р\_урал\_а;

- «Организация и проведение международной школы-семинара «Геоинформационное обеспечение модернизации России. Организационный, технологический и кадровый потенциал», № 11-05-06087-г;
- «Прогнозирование интенсивности процессов снеготаяния методами геостатистического анализа (на примере бассейна Воткинского водохранилища)», № 11-05-96026-р\_офи;
- «Комплексный подход в исследовании динамики процессов снеготаяния на водосборах рек», № 11-05-00858-а;
- «Разработка технологии оперативного мониторинга и прогноза затопления территории при образовании ледового затора», № 4.В37.21.1891;
- «Влияние циклонической деятельности на условия формирования снежного покрова на Урале», № 2011-1.2.1-220-010-086.

Результаты исследований и материалы работы используются в Пермском государственном национальном исследовательском университете для проведения занятий по учебным курсам: «Введение в геоинформатику», «Геоинформатика», «Геоинформационные системы», а также включены в содержание 5 учебно-методических пособий: «Геоинформационные системы и технологии. Основные понятия, определения и опыт применения»; «Определение гидрографических характеристик водных объектов»; «Использование геоинформационных систем и технологий при решении пространственных задач»; «Геоинформатика»; «Геоинформационные системы».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на 38 научных конференциях и совещаниях: IV Международная конференция «Распознавание образов и анализ изображений» (Новосибирск, 1998); Второй Всероссийский научный молодежный симпозиум «Безопасность биосферы – 98» (Свердловск, 1998); Научно-практическая конференция «Гидрология Урала на рубеже веков» (Пермь, 1999); VII Всероссийский форум «Геоинформационные технологии. Управление. Природопользование. Бизнес. Образование» (Москва, 2000); Международная научно-практическая конференция «Геоинформатика – 2000» (Томск, 2000); Международная научно-практическая конференция «География, общество, окружающая среда: развитие географии в странах Центральной и Восточной Европы» (Калининград, 2001); Международная конференция «Интер-Карто VIII: ГИС для устойчивого развития территорий» (Санкт-Петербург, 2002); Научная конференция по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды в государствах-участниках СНГ, посвященная 10-летию образования Межгосударственного совета по гидрометеорологии (Санкт-Петербург, 2002); Международная научно-практическая конференция «География и регион» (Пермь, 2002); IX Всероссийский форум «Геоинформационные технологии. Управление. Природопользование. Бизнес. Образование» (Москва, 2002); X Всероссийский форум «Геоинформационные технологии. Управление. Природопользование. Бизнес. Образование» (Москва, 2003); Международная конференция «Взаимодействие общества и окружающей среды в условиях глобальных и регио-

нальных изменений» (Барнаул, 2003); XI Всероссийский форум «Геоинформационные технологии. Управление. Природопользование. Бизнес. Образование». 2–8 июня 2004 (Москва, 2004); Международная конференция «ИнтерКарто-ИнтерГИС – 10»: ГИС для устойчивого развития территорий. Международная конференция. 12–19 июля 2004. Владивосток (Россия), Чанчунь (КНР); Международная выставка и научный конгресс «ГеоСибирь–2005» (Новосибирск, 2005); Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы исследований водохранилищ» (Пермь, 2005); XII Всероссийский форум «Геоинформационные технологии. Управление. Природопользование. Бизнес. Образование» (Москва, 2005). Международная выставка и научный конгресс «ГЕО-СИБИРЬ – 2006», 17–19 апреля 2006, Новосибирск; XIV Всероссийский форум «Рынок геоинформатики в России. Современное состояние и перспективы развития». 5–7 июня 2007. Москва; Международная конференция Международная конференция «ИнтерКарто-ИнтерГИС – 13»: Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт. Ханты-Мансийск (Россия) – Йеллоунайф (Канада). 12–14 августа 2007 г.; 12-я Всероссийская учебно-практическая конференция «Организация, технологии и опыт ведения кадастровых работ». 13–15 ноября 2007. Москва; XV Всероссийский форум «Рынок геоинформатики в России. Современное состояние и перспективы развития». 3–5 июня 2008 г.; Международная конференция Международная конференция «ИнтерКарто-ИнтерГИС – 14»: Устойчивое развитие территорий: Теория ГИС и практический опыт» 24 июня – 1 июля 2008 г.; Межрегиональная научно-практическая конференция «Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края» 22–23 октября 2008 г.; «Рождественские чтения». Пермь. ПГУ. 5–6 января 2009 г.; Международная конференция Международная конференция «ИнтерКарто-ИнтерГИС – 15»: Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт. Sustainable development of territories: GIS theory and practice». 25 июня – 3 июля 2009 г. Пермь; Региональная научная конференция «Историко-культурное наследие и информационно-коммуникационные технологии: сохранение и исследование». 13 ноября 2009 г.; II Межрегиональная научно-практическая конференция «Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края». 17–18 ноября 2009 г.; Межрегиональный конгресс «Комфортный город». Круглый стол «ГИС-технологии: управление урбанизированными территориями». 15 марта 2010 г.; XVII Всероссийский форум «Рынок геоинформатики в России. Современное состояние и перспективы развития». Калуга. 25–27 мая 2010 г.; Международная конференция «ИнтерКарто-ИнтерГИС – 16»: Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт: Материалы международной конференции (Ростов-на Дону (Россия), Зальцбург (Австрия), 3–4 июля 2010 г.; III Межрегиональная научно-практическая конференция «Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края». 17–18 ноября 2010 г.; Международная научная конференция (19–21 мая 2011 г.) «Землеустройство: история и современность». Май. 2011 г.; Международный семинар «От наземной станции приема ДДЗ – к интегра-



ции и сетевым решениям». 4–11 февраля 2011 г. Кемер. Турция; Всероссийская школа-семинар «Использование данных дистанционного зондирования Земли в управлении лесными ресурсами». ПГУ. 15–16 февраля 2011 г.; Международная школа-семинар «Геоинформационное обеспечение модернизации России и стран СНГ. Организационный, технологический и кадровый потенциал». Пермь – Казань – Саратов – Астрахань – Волгоград – Самара – Пермь. 25 сентября – 9 октября 2011 г.; Международная конференция «ИнтерКарто-ИнтерГИС – 17»: Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт: Материалы международной конференции. Барнаул (Россия), (Индонезия), декабрь 2011 г.; IV Межрегиональная научно-практическая конференция «Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края». 17–18 ноября 2011 г.; V Межрегиональная научно-практическая конференция «Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края». 14–15 ноября 2012 г.

**Публикации.** Автором опубликовано 115 работ. Из них по теме диссертации 60, в том числе монографий 4, статей 28 (13 в изданиях из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ), материалов конференций и тезисов докладов 28. Имеются три свидетельства о государственной регистрации базы данных в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам: № 2010620078 – Региональная гидрологическая ГИС «Бассейн Воткинского водохранилища», № 2010620079 – Гидрологическая ГИС «Водохранилища камского каскада» от 1 февраля 2010 г. (в соавторстве с В.Г. Калининым) и № 2011620638 – Геоинформационная система «Гидротехнические сооружения Пермского края» (ГИС ГТС «Пермского края») от 8 сентября 2011 г. (в соавторстве с Ю.Н. Шавниной), а также 8 свидетельств отраслевой разработки.

**Структура и объем работы.** Диссертация объемом 210 страниц машинописного текста состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 123 источника и 7 приложений. В ней содержится 67 рисунков и 24 таблицы.

**Автор выражает благодарность** научному консультанту, заведующему кафедрой метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета, д.г.н., профессору Калинину Н.А. за полезные советы и рекомендации; доценту кафедры физической географии и ландшафтной экологии, к.г.н. Соболевой Е.Б., заместителю директора Естественно-научного института Пермского государственного национального исследовательского университета, к.г.-м.н. Максимовичу Н.Г. за внимание, проявленное к работе и ценные замечания, а также профессору кафедры физической географии и ландшафтной экологии, д.г.н. Калинину В.Г.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность работы, излагаются цели и задачи исследования, дана оценка их научной новизны и практической значимости. Приведен перечень защищаемых положений и наиболее значимых

результатов, выносимых на защиту. Приводятся сведения о работе и ее структуре.

**В первой главе** приведены основные термины и определения, используемые в работе. На примере ряда реализованных проектов показано, что использование геоинформационных технологий в геоэкологических исследованиях нашло широкое применение, поскольку эти исследования носят пространственный характер. Одним из важнейших классов решаемых задач являются задачи моделирования гидрологических процессов и явлений.

Показано, что создание гидрологической ГИС направлено на решение широкого класса задач, весь спектр которых по степени сложности можно разделить на четыре группы:

1. Создание и ведение составляющих гидрологической базы данных;
2. Определение и уточнение гидрографических, гидрологических характеристик рек и их бассейнов, а также морфометрических характеристик водохранилищ как при нормальном подпорном горизонте, так и разных уровнях сработки (в том числе не линейной);
3. Цифровое математико-картографическое моделирование для расчета гидрографических, гидрологических и морфометрических показателей
4. Гидрологический анализ,

В разработанной региональной гидрологической ГИС представлен весь спектр указанных задач.

В ГИС предусмотрена возможность задавать критерии, относительно которых будет создан тематический слой на основе исходного файла. Этот слой состоит только из объектов, удовлетворяющих условию запроса, что в свою очередь позволяет на основе одного и того же файла создавать множество слоев, каждый из которых отвечает соответствующей тематической характеристике.

Достоинством региональной гидрологической ГИС является вычисление пространственных характеристик. Так, в пределах любого бассейна имеется возможность расчета линейных и площадных параметров объектов, причем, как суммарных значений, например, длины рек или площади, занятой озерами, так и с вычислением показателей каждого объекта и его доли от общего суммарного значения, что очень важно для исследований и расчетов речного стока, особенно по неизученным рекам. Следующей важной функциональной особенностью созданной ГИС является возможность выделения глубоководной, мелководной и прибрежной зон и подзон в пределах какого-либо участка водохранилища и расчет их морфометрических характеристик. Определение этих таксонов выполняется по заданным пользователем критериям в виде значений глубин на их границах с последующим созданием векторных и растровых слоев, по которым вычисляются площади и пространственная статистика. Также предусмотрен расчет различных морфометрических характеристик любых таксономических единиц водохранилищ с картографическим отображением результатов вычислений на основе цифровых моделей рельефа дна. При выполнении исследований морфологических особенностей како-

го-либо участка водоема имеется возможность построения поперечных разрезов в любом интересующем месте и с любым шагом.

Предусмотрена статистическая обработка атрибутивных баз данных для любой метеостанции или гидрологического поста. Результатом статистической обработки ряда наблюдений является стандартный набор описательной статистики (количество членов ряда, среднее, максимальное, минимальное, среднеквадратическое отклонение, амплитуда), включая коэффициенты вариации и асимметрии. Эти показатели являются важной информацией, характеризующей закономерности распределения случайной величины.

Этот достаточно стандартный набор функций в единой среде ГИС позволяет более гибко управлять данными (в том числе и пространственными) (изъятие и добавление характерных или не характерных наблюдений, добавление новых бассейнов, отвечающих ряду характеристик и т.д.). В связи с этим появляется возможность более оперативного и качественного анализа.

Для работы с данными с непрерывной характеристикой (GRID) в ГИС программно реализован модуль некоторых вычислительных функций, объединенных в один интерфейс. К ним, например, относится необходимость корректирования и исправления ошибок, полученных при математико-картографическом моделировании цифровой модели (краевой эффект, превышение допустимых значений, ошибки округления).

Выполняется расчет выбранного показателя (минимума, максимума, среднего, медианы, суммы, диапазона, стандартного отклонения, большинства, меньшинства и числа уникальных значений) по значениям ячеек GRID в пределах контура (области соседства), задаваемого пользователем (прямоугольник, круг, кольцо, сектор) (фокальная статистика).

Вычисление описательной статистики значений ячеек GRID в пределах выбранного полигонального объекта(ов) или попадающих в контур (полигон, прямоугольник, круг) позволяет рассмотреть неоднородность распределения пространственной характеристики гидрологического объекта или явления.

Пространственная корреляция основана на двух способах формирования выборок: методом плавающего окна и на основе бассейнового подхода. При использовании первого способа формируется новый GRID, в ячейках которого содержатся значения коэффициентов корреляции. Это дает возможность выполнения пространственного анализа изменения тесноты связи между исследуемыми характеристиками (GRID) в пределах любой территории. При использовании второго способа вычисляются коэффициенты корреляции для каждого из бассейнов (на которых организованы режимные наблюдения), ограничивающих по контуру исследуемые GRID. Результаты вычислений формируются в виде таблицы. На основе данных таблицы и слоя с центрами тяжести бассейнов существует возможность построения карты изокоррелят или нового GRID.

**Во второй главе** рассматривается использование математико-картографических методов при оценке гидрографических характеристик рек и их бассейнов в расчетах поверхностного стока. Как известно, гидрологический режим водных объектов определяется комплексным влиянием климата,

рельефа, состава коренных пород, почвенно-растительного покрова территории. Климатические особенности характеризуются пространственно-временными неоднородностями распределения солнечной радиации, осадков и испарения, господствующего переноса воздушных потоков, мощности снежного покрова и глубины промерзания почвогрунтов.

Доказано, что кроме основных гидрографических характеристик могут быть использованы новые показатели и коэффициенты, определение которых традиционными методами крайне сложно или практически невозможно. Однако они играют далеко не последнюю роль в понимании ряда важнейших гидрологических процессов и явлений и позволяют, особенно при отсутствии данных наблюдений, косвенным путем получить важные гидрологические сведения. К их числу следует отнести порядки рек, а также суммарные длины рек и горизонталей в пределах бассейна, коэффициенты расчлененности рельефа.

Выявленные закономерности формирования поверхностного стока являются весьма показательными и, безусловно, найдут применение для изучения и оценки водных ресурсов рассматриваемой территории, а также для определения режимной гидрологической информации наряду с известными расчетными методами.

В гидрологических исследованиях для выявления закономерностей характеристик стока от определяющих факторов широко применяются методы корреляционного и регрессионного анализа, которые сводятся к построению локальных зависимостей и их аппроксимации математическими функциями. В работе рассмотрены особенности создания карт пространственного распределения корреляционной и регрессионной функций на примере зависимости зимнего стока от определяющих факторов.

Предложен новый метод формирования выборки в пределах бассейна, где каждому значению ячейки раstra пространственно строго соответствует значение ячейки другого раstra, т.е. фактически формируются парные массивы значений из ячеек о стоке и осадках отдельно по каждому бассейну. Вычисленные коэффициенты корреляции помещаются в центры тяжести водосборов, и эти данные интерполируются для всей рассматриваемой территории. Этот метод позволяет выявить основные закономерности распределения коэффициентов корреляции (регрессии) по исследуемой территории и представляет собой новый методологический подход к исследованиям особенностей формирования стока в зависимости от определяющих факторов с использованием геоинформационных технологий и пространственного корреляционного и регрессионного анализа. Построение подобных карт дает возможность получить дополнительную информацию для исследования стока неизученных рек.

В то же время одним из способов учета может являться разработка и использование обобщенного интегрального показателя, отражающего комплексное влияние основных факторов формирования стока.

Для создания обобщенного интегрального показателя использован метод экспертно-статистической регрессионной модели. Эти модели используются

для анализа временных и пространственных рядов, а также для построения карт статистических поверхностей, характеризующих пространственные закономерности процессов и явлений.

При построении обобщенного интегрального показателя экспертно-статистическим методом наряду с исходными данными необходимо располагать сведениями о значениях экспертных оценок  $Z_{i_{эксп}}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , под которыми понимаются количественные или порядковые значения, не поддающиеся непосредственному измерению и основывающиеся на суждениях специалистов.

Эти данные используются в качестве обучающей выборки классической линейной модели множественной регрессии вида

$$Z_{i_{\text{эксп}}} = \theta_1 x_i'^{(1)} + \theta_2 x_i'^{(2)} + \dots + \theta_k x_i'^{(k)} + \varepsilon_i,$$

где  $x_i'^{(j)}$  – либо нормированные, либо ранговые показатели,  $\varepsilon_i$  – случайные регрессионные остатки, удовлетворяющие всем условиям классической модели (т.е. они имеют нулевые средние значения, взаимно некоррелированы и однородны), а  $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_k)^T$  – вектор экспертных оценок, при этом  $\sum_{i=1}^k \theta_i = 1$ .

Оценив, таким образом, неизвестные коэффициенты  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$  и обозначив

$$z_i = \sum_{j=1}^k \theta_j x_i'^{(j)},$$

можно определить способ вычисления значений обобщенного интегрального показателя.

Следующим шагом исследования стала оценка возможности оптимизации выбора коэффициентов, учитывающих степень влияния отдельных факторов на формирование зимнего стока, т.е. нахождение таких коэффициентов, при которых будет наблюдаться наиболее тесная зависимость зимнего стока от интегрального показателя.

Оптимизация основана на принципе использования критерия максимизации коэффициента корреляции  $r_i$  между переменными  $y_i$  – характеристики стока и  $Z_{i_{\text{эксп}}}$  – интегрального показателя. Таким образом, целевая функция будет иметь следующий вид:

$$r_i = \frac{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - \bar{z}_i)(y_{ij} - \bar{y}_i)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - \bar{z}_i)^2 (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}} \rightarrow \max,$$

где  $i$  – водосбор;  $j$  – ячейка, принадлежащая  $i$  – водосбору;  $y_{ij}$  – значение стока в  $j$  – ячейке;  $z_{ij}$  – значение интегрального показателя в  $j$  – ячейке;  $r_i$  – коэффициент корреляции для отдельного  $i$  – водосбора между значениями интегрального показателя и стока.

В качестве ограничений целевой функции примем следующие:

$$r_i \leq 1; \sum_{k=1}^m \theta_k = 1; 0 \leq \theta_k \leq 1, \text{ где } k - \text{фактор; } m - \text{их число.}$$

Для реализации этой цели использованы алгоритмы автоматизированного поиска значений  $\theta_k$ , основанные на нелинейной оптимизации (метод Ньютона, метод сопряженных градиентов), сходимость которых определяется, в частности, начальными условиями, то есть тем, как были представлены градации признака перед запуском процедуры оптимизации.

Использование обобщенного интегрального показателя дает возможность комплексного учета основных факторов, а также оценки степени влияния каждого из них, однако применение методов оптимизации коэффициентов корреляционной зависимости позволяет делать это наиболее объективно.

**В третьей главе** рассматривается применение непараметрического вероятностно-статистического подхода к проблеме получения формальных выводов о наступлении существенных качественных изменений состояния водохранилища, вызванных понижением его уровня. При моделировании сработки водохранилища на заданный уровень, этот подход позволяет оценивать непараметрические функции распределения глубин и их параметры, а также строить графики функций распределения глубин. Выводы о качественных морфологических изменениях в водохранилище можно сделать по оцененным параметрам и графикам функций распределения глубин. По этим

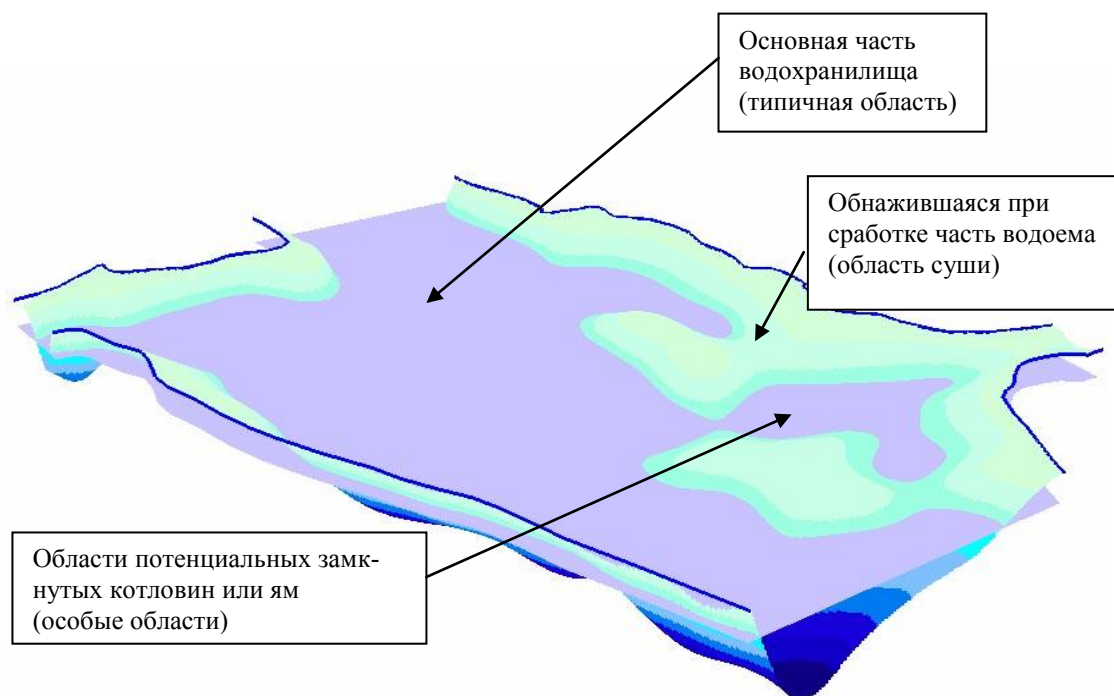


Рис. 1. Морфологические изменения водохранилища при понижении уровня воды

результатам возможна классификация участков водохранилища в зависимости от изменения их морфометрических особенностей при понижении уровня воды. Эти изменения возникают из-за уменьшения площадей участков водохранилища, покрытых водой, а также возможного появления отдельных замкнутых котловин (ям), не связанных с основной частью водохранилища (рис. 1).

Характерными признаками наступления качественных изменений являются:

- обнажение значительной площади дна при относительно небольшом понижении общего уровня водохранилища;
- появление сравнительно неглубоких заполненных водой ям с большой площадью зеркала;
- уменьшение средней глубины водохранилища при относительно небольшом понижении уровня.

В математической модели рабочая область карты отождествляется с прямоугольником  $\Omega$ . Примем следующие обозначения:

1.  $a, a \geq 0$  – текущая величина понижения уровня воды в водохранилище или величина сработки.
2.  $\Omega_0(a)$  – область карты, соответствующая водохранилищу, а  $\Omega(a)$  – его типичной области после понижения общего уровня до отметки  $a$ .
3.  $\Omega_k$  – область на карте, соответствующая  $k$ -ой потенциальной яме,  $h_k$  – глубина появления  $k$ -ой потенциальной ямы,  $h_k^*$  – максимальная глубина  $k$ -ой потенциальной ямы.  $\Omega_k(x)$  – зеркало сечения  $k$ -ой ямы на глубине  $x$  от ее края.
4.  $\nu$  – число потенциальных ям,  $\nu(a)$  – число обнажившихся потенциальных ям.
5.  $F_a(x)$  – функция распределения глубины водохранилища в наудачу взятой точке типичной области при условии, что общий уровень равен " $-a$ ".
6.  $H_k(x|a)$  – функция распределения глубины  $k$ -ой потенциальной ямы в наудачу взятой точке при том же условии, что общий уровень равен " $-a$ ".
7.  $S = \text{mes}(\Omega), S_0 = \text{mes}(\Omega_0), S_k = \text{mes}(\Omega_k)$  – площади описанных выше областей.  $S_k(x) = \text{mes}(\Omega_k(x))$  – площадь сечения  $k$ -ой потенциальной ямы на глубине  $x$  от ее края,  $S(a) = \text{mes}(\Omega(a))$  – площадь типичной области водохранилища на отметке  $a$ .
8.  $p(a) = \frac{S(a)}{S}, p_k = \frac{S_k}{S}$  – веса рассматриваемых областей.

В принятых обозначениях функция распределения глубины водохранилища в наудачу взятой точке прямоугольника  $\Omega$  при условии, что общий уровень водохранилища равен " $-a$ ", определяется следующей формулой:

$$G(x) = q(a) + p(a)F_a(x) + \sum_{k=1}^v p_k H_k(x|a) \quad \text{для } x > 0$$

Было показано, что математическое ожидание и дисперсия равны:

$$\begin{aligned} \mu_1(a) &= \int_0^{+\infty} \frac{\left[ p(a)(1 - F_a(x)) + \sum_{k=1}^v p_k (1 - H_k(x|a)) \right]}{p(a) + \sum_{k=1}^v p_k} dx. \\ D(a) &= 2 \int_0^{+\infty} x \frac{\left[ p(a)(1 - F_a(x)) + \sum_{k=1}^v p_k (1 - H_k(x|a)) \right]}{p(a) + \sum_{k=1}^v p_k} dx - \\ &\quad - \left[ \int_0^{+\infty} \frac{\left[ p(a)(1 - F_a(x)) + \sum_{k=1}^v p_k (1 - H_k(x|a)) \right]}{p(a) + \sum_{k=1}^v p_k} dx \right]^2. \end{aligned}$$

Для оценивания неизвестных параметров  $\mu(a, \varepsilon)$ ,  $\sigma(a, \varepsilon)$  применим метод квантилей, который является менее чувствительным к отклонениям от нормальности. Для  $p$ ,  $0 < p < 0,5$  обозначим через  $z_p$ ,  $z_{1-p}$  квантили стандартного нормального закона уровней  $p$ ,  $1-p$ . Так как стандартная нормальная плотность симметрична, то  $z_p = -z_{(1-p)}$ . Тогда искомые оценки находятся из уравнений:

$$z_p \sigma(a, \varepsilon) \sqrt{m} + m \mu(a, \varepsilon) = u_{(np)}(a, \varepsilon),$$

$$z_{1-p} \sigma(a, \varepsilon) \sqrt{m} + m \mu(a, \varepsilon) = u_{(n(1-p))}(a, \varepsilon),$$

где  $u_{(na)}(a, \varepsilon) = \left( \sum_{j=1}^m v_{(k-1)m+j}(a, \varepsilon) \right)_{(na)}$  – эмпирическая квантиль уровня  $\alpha$ , т.е. элемент ряда порядковых статистик с номером  $[n\alpha] + 1$ . Решив эти уравнения

получим следующие оценки среднего и среднеквадратичного отклонения

$$\hat{\mu}(a, \varepsilon) = \frac{z_p u_{(n(1-p))}(a, \varepsilon) - z_{1-p} u_{(np)}(a, \varepsilon)}{(z_p - z_{1-p})m},$$

$$\hat{\sigma}(a, \varepsilon) = \frac{u_{(np)}(a, \varepsilon) - u_{(n(1-p))}(a, \varepsilon)}{(z_p - z_{1-p})\sqrt{m}}$$

или с учетом связи  $z_p = -z_{(1-p)}$

$$\hat{\mu}(a, \varepsilon) = \frac{u_{(n(1-p))}(a, \varepsilon) + u_{(np)}(a, \varepsilon)}{2m},$$

$$\hat{\sigma}(a, \varepsilon) = \frac{u_{(n(1-p))}(a, \varepsilon) - u_{(np)}(a, \varepsilon)}{2z_{1-p}\sqrt{m}}.$$



Задача проверки гипотезы о динамике изменения глубины при сработке уровня воды может быть формализована в двух направлениях. Можно проверить гипотезу о незначительном изменении средней глубины на изучаемом участке при небольшом понижении уровня воды. Отвержение гипотезы означает, что на данном участке площадь мелководной зоны значительно превосходит глубоководную зону. Если, напротив, проверялась гипотеза о существенном изменении средней глубины при небольшом понижении уровня воды, то отвержение ее означает, что на данном участке площадь глубоководной зоны значительно превосходит площадь мелководья.

Формально обе задачи совершенно одинаковы. Пусть проверяется гипотеза  $H_0: \mu(a) = \mu_0 a$  против альтернативы  $H_1: \mu(a) > \mu_0 a$ . Поскольку эти гипотезы эквивалентны гипотезам

$$H_0^*: \frac{\mu(a) - \mu_0(a)}{\sigma(a, \varepsilon)} = 0, H_1^*: \frac{\mu(a) - \mu_0(a)}{\sigma(a, \varepsilon)} > 0,$$

то нулевая гипотеза отвергается в пользу альтернативы, если

$$\frac{\hat{\mu}(a, \varepsilon) - \mu_0(a)}{\hat{\sigma}(a, \varepsilon)} > C,$$

где  $C$  подходящая постоянная, которая, как обычно, выбирается из ограничения на размер критерия. Легко видеть, что предложенный критерий эквивалентен критерию вида  $T > C$ . Поэтому  $C$  определяется из уравнения

$$P(T > C) = \int_C^{+\infty} w(x) dx = \frac{1}{2} \left( 1 - \int_{-C}^{+C} w(x) dx \right) = \delta,$$

где  $\delta$  – заданный уровень значимости.

Если нулевой гипотезой является  $H_0: \mu(a) = \mu_0 a$ , а альтернативной  $H_1: \mu(a) < \mu_0 a$ , то эквивалентными им гипотезами теперь будут

$$H_0^*: \frac{\mu(a) - \mu_0(a)}{\sigma(a, \varepsilon)} = 0, H_1^*: \frac{\mu(a) - \mu_0(a)}{\sigma(a, \varepsilon)} < 0.$$

Так что теперь нулевую гипотезу следует отвергнуть в пользу альтернативы, если окажется, что  $T < C$ . Поскольку вероятность этого события должна быть маленькой при гипотезе  $H_0$ , то  $C < 0$  и его модуль определяется уравнением

$$P(T > |C|) = \int_{|C|}^{+\infty} w(x) dx = \frac{1}{2} \left( 1 - \int_{-|C|}^{|C|} w(x) dx \right) = \delta.$$

Предложены алгоритмы математико-картографического моделирования состояния водохранилища при сработке на заданную величину, обнаружения точек, попавших в особую область, а также геостатистического моделирования процесса сработки и обнаружения качественных изменений состояния водохранилища. На их основе в среде ArcGIS создан программный инструмент моделирования и расчета характеристик участков водохранилища. Он был верифицирован на одном из них (Обвинский залив Камского водохранилища).

Анализ результатов показал, что по графикам функции  $G_a(x)$  можно визуально оценить квантили распределения глубин при разных уровнях сработки. При этом по формам кривой непараметрической смешанной функции распределения глубин можно судить о качественном изменении формы рельефа дна рассматриваемого участка.

Были оценены параметры непараметрической смешанной функции распределения глубин  $(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$  и построены графики зависимостей этих параметров от уровня сработки.

Выполнено моделирование качественных изменений состояния водохранилища при понижении уровня воды со следующими параметрами:  $p_0 = 0,1$ ,  $p = 0,11$ ,  $\delta = 0,05$ ,  $w = 0,95$ ,  $z_{1-\delta} = 1,96$ , т.е. качественные изменения наступят при уменьшении площади участка на 10 % с вероятностью 95 %.

Таблица 1

Модельные значения  $n$ ,  $n_1$  при разных уровнях сработки

Уровень сработки, м	$n$	$n_1$	$n_1/n$	$C$
1,87	14668	1327	0,090	0,101
1,88	14638	1392	0,951	
1,89	14619	1430	0,978	
<b>1,90</b>	14758	1523	0,103	

Примечание:  $n$  – общее число точек, попавших в типичную область;  $n_1$  – число точек, попавших в обнажившуюся область.

Как видно из табл. 1 гипотеза, отражающая несущественные изменения, отвергается в пользу альтернативной при величине сработки 1,90 м. Таким образом, этот уровень сработки соответствует качественному (10 %) изменению площади рассматриваемого участка водохранилища.

Это свидетельствует о том, что прибрежная зона на данном участке практически отсутствует, и мы имеем дело с крутым склоном затопленной долины. Полное обнажение склона наблюдается при последующих двух качественных изменениях. При дальнейшем понижении уровня склон долины выполаживается и переходит в надпойменную террасу.

Таким образом, предложен новый подход к выделению таксономических единиц в пределах участков водохранилищ, который совместно с генетическим подходом даст более объективные критерии выделения этих зон для характеристики морфометрических особенностей и их влияния на элементы гидрологического режима участков водохранилищ.

Вследствие понижения уровня воды и характера рельефа дна образуются многочисленные замкнутые котловины, способствующие развитию заморных

явлений на водоеме. Кроме того, наличие таких понижений может отрицательно сказываться на работе водозаборов, являться местами накопления сбросов и т.д. Количество, местоположение и размеры этих котловин зависят от уровня сработки водохранилища и характера подводного рельефа. Определение перечисленных характеристик традиционными способами не представляется возможным. В то же время проблема достаточно актуальна, поскольку понижение уровня воды существенным образом сказывается на условиях зимовки гидробионтов. Для предотвращения гибели и решения проблем охраны и воспроизводства рыбных запасов необходимо планирование водно-мелиоративных работ, проведение которых предусматривает знание масштабов развития заморных явлений на водохранилищах.

На основе созданных ЦМР Камского и Воткинского водохранилищ и применения ГИС-технологий выполнено моделирование мест формирования возможных заморных явлений и обсыхания нерестилищ в результате зимней сработки уровня воды.

**В четвертой главе** показаны возможности использования математико-картографического моделирования для проведения геоэкологической оценки и прогноза состояния малых водохранилищ (на примере Нижнезырянского, Пермский край, г. Березники). Аварийная ситуация привела к затоплению одного из рудников и образованию крупного провала в промышленной части города, в непосредственной близости от водохранилища. Во избежание катастрофических процессов без достаточных обоснований было начато снижение его уровня, а в перспективе был поставлен вопрос о полном спуске. В этой связи возникла необходимость в сжатые сроки оценить экологические последствия ликвидации данного водоема.

Водохранилища, расположенные в промышленно развитых районах, подвержены воздействию сточных вод различных видов, преобладающими среди которых являются городские, ливневые, промышленные, сельскохозяйственные. Загрязняющие вещества, такие как тяжелые металлы, радионуклиды, пестициды, гербициды и другие, нередко присутствуют в водах в растворенном состоянии. Попадая в водохранилища, они могут выпадать из раствора в осадок, адсорбироваться на тонкодисперсных взвешенных частицах и осаждаться вместе с ними. Этим обуславливается многократное превышение концентрации поллютантов в донных отложениях над их содержанием в водной толще.

Более глубокие и плотные слои донных отложений, неподверженные размывающему воздействию ветрового волнения, подвергаются эрозии под действием основного и боковых притоков, а также плоскостного и ручейкового стоков. Масштабы ремобилизации и смыва этой части донных отложений во многом определяются объемом и механическим составом осадков, накопившихся за время существования водохранилища, а также условиями (стратегией) осушения водоема. Для искусственных водоемов малого размера характерен размыв и вынос большей части донных отложений; в сравнительно больших водохранилищах, ширина которых намного превышает ширину реки в незарегулированном состоянии, значительное количество дон-

ных отложений после спуска, как правило, остается на месте. При этом эрозии подвергается, главным образом, только часть донных отложений, лежащая в пределах новообразованного русла и поймы.

Таким образом, основные экологические последствия при спуске водохранилищ связаны с ухудшением качества воды за счет повышенной мутности и выноса загрязняющих веществ из донных отложений в водную толщу, нарушением среды местообитания водных организмов, изменением характера русловых процессов в результате переотложения наносов, а также с рядом гидробиологических и гидрохимических изменений, обусловленных сменой зарегулированного стока на речной режим.

Основой для решения задач, связанных с процессом сработки водоема и определением мощности отложений, служит создание оптимальной цифровой модели рельефа дна водоема, построенной математико-картографическими методами на основе информации о состоянии территории до и после образования водоема. Для решения проблемы получения формальных выводов о процессе сработки на территории Нижнезырянского водохранилища с учетом понижения его уровня реализован программный инструмент, позволяющий применить определенный статистический подход: моделировать сброс воды в водохранилище на заданный уровень с получением полигонального слоя, содержащего информацию о не осушенных и осушенных областях водохранилища с пространственной оценкой донных отложений (рис. 2).

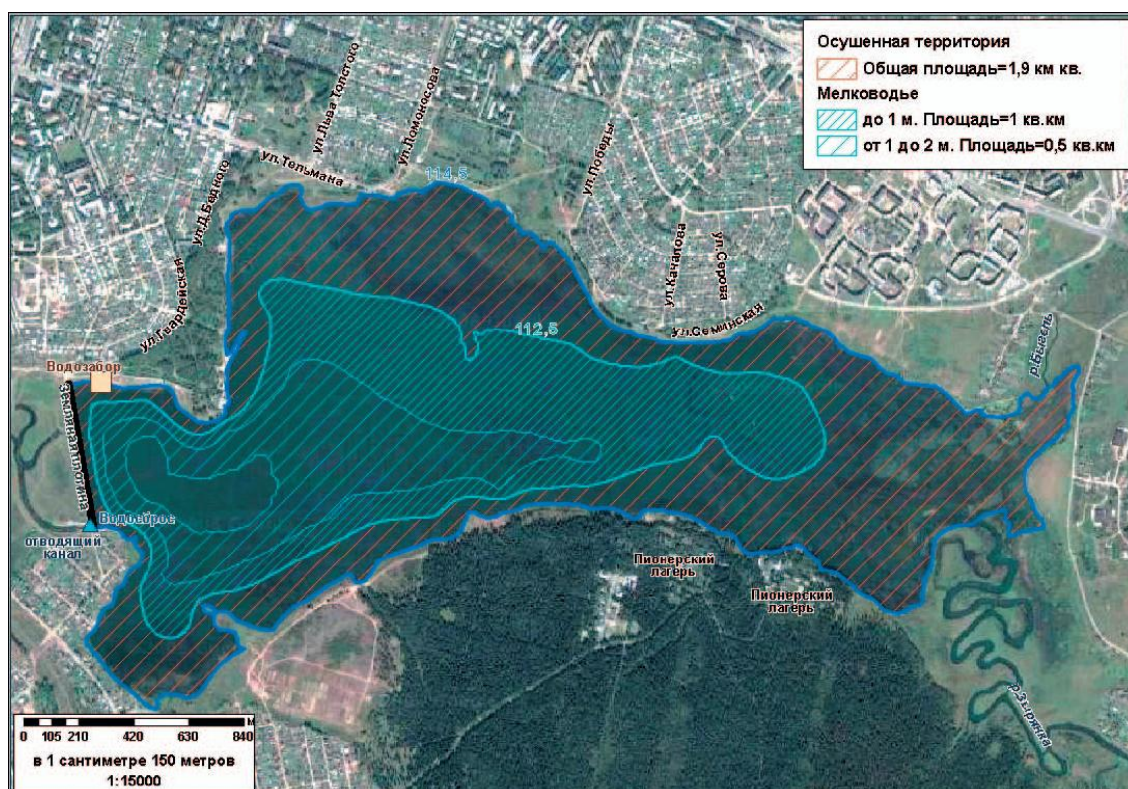


Рис. 2. Анализ морфометрической структуры дна водохранилища при сработке на 2 м

По вычисленным статистическим характеристикам и графикам функций распределения глубин производится анализ морфометрической структуры дна, также возможно сделать выводы о принадлежности морфометрической структуры дна одному из типов классификации.

Для определения средних мощностей донных отложений на различных участках построены и совмещены профили дна водохранилища по старым проектным глубинам с учетом оседания поверхности и по современным глубинам (рис. 3). Помимо оседания поверхности дна, при вычислении объема отложений учитывалось и старое русло реки.

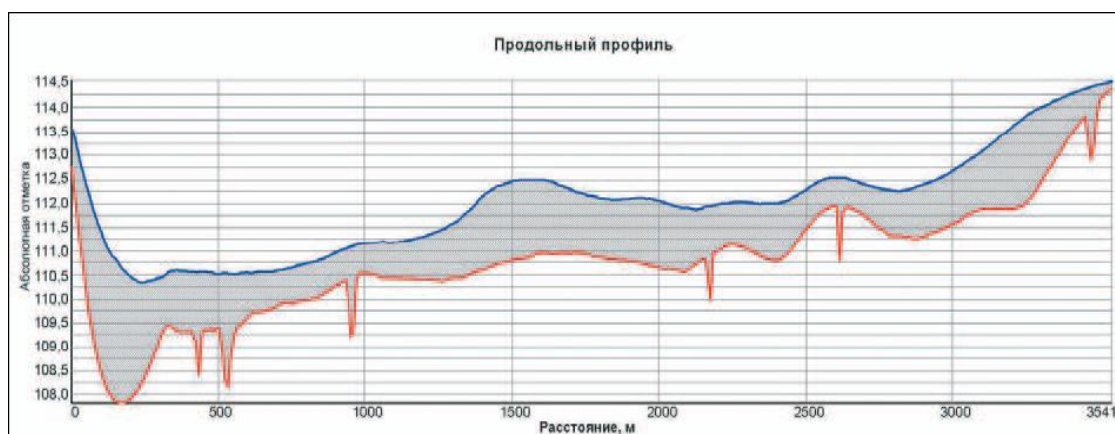


Рис. 3. Продольный гипсометрический профиль дна Нижнезырянского водохранилища (— глубина до затопления с учетом оседания; — современная глубина; донные отложения)

Размеры и форма водохранилища изменятся в первую очередь за счет уменьшения объема воды, площади зеркала, глубины и ширины. После предполагаемого спуска воды водоем приобретет более вытянутую форму, что находит свое отражение в увеличении удлиненности. Возможно, потребуется удаление части донных отложений для сокращения площади мелководных зон. Следует отметить, что после снижения уровня начнется интенсивный снос осушенных донных отложений в оставшуюся часть водохранилища, что приведет к его обмелению и расширению мелководной зоны.

Распределение донных отложений по акватории водохранилища отличается большой неравномерностью (рис. 4), обусловленной морфометрическими особенностями водоема. Общей закономерностью распределения отложений является увеличение их мощности от верховьев к плотине и от берегов к затопленному руслу р. Зырянка, что наглядно иллюстрируют гипсометрические профили дна водохранилища (рис. 3). На фоне относительно небольших мощностей донных отложений, не превышающих 1 м, имеются участки дна с повышенными мощностями отложений. По характеру их распределения Нижнезырянское водохранилище



можно разделить на 3 участка. Первый участок приурочен к верховью водохранилища. Здесь наблюдается крупный ареал донных отложений, мощность которых составляет 1–2 м. В центральной части водоема находится второй значительный по площади ареал повышенных (1–2 м) мощностей донных отложений, приуроченный к ее озеровидному расширению. Еще более значительные мощности донных отложений наблюдаются в самой глубокой, приплотинной, части водохранилища. Здесь сформировался заметный ареал донных отложений, высота слоя которых достигает 3 м. Наибольшие толщи донных отложений наблюдаются в затопленном русле рек Зырянка и Быгель, где они на 1–1,2 м выше, чем на примыкающих к руслу участках дна. В затопленном русле приплотинной части водоема была зафиксирована максимальная для водохранилища мощность донных отложений, составившая 4,3 м

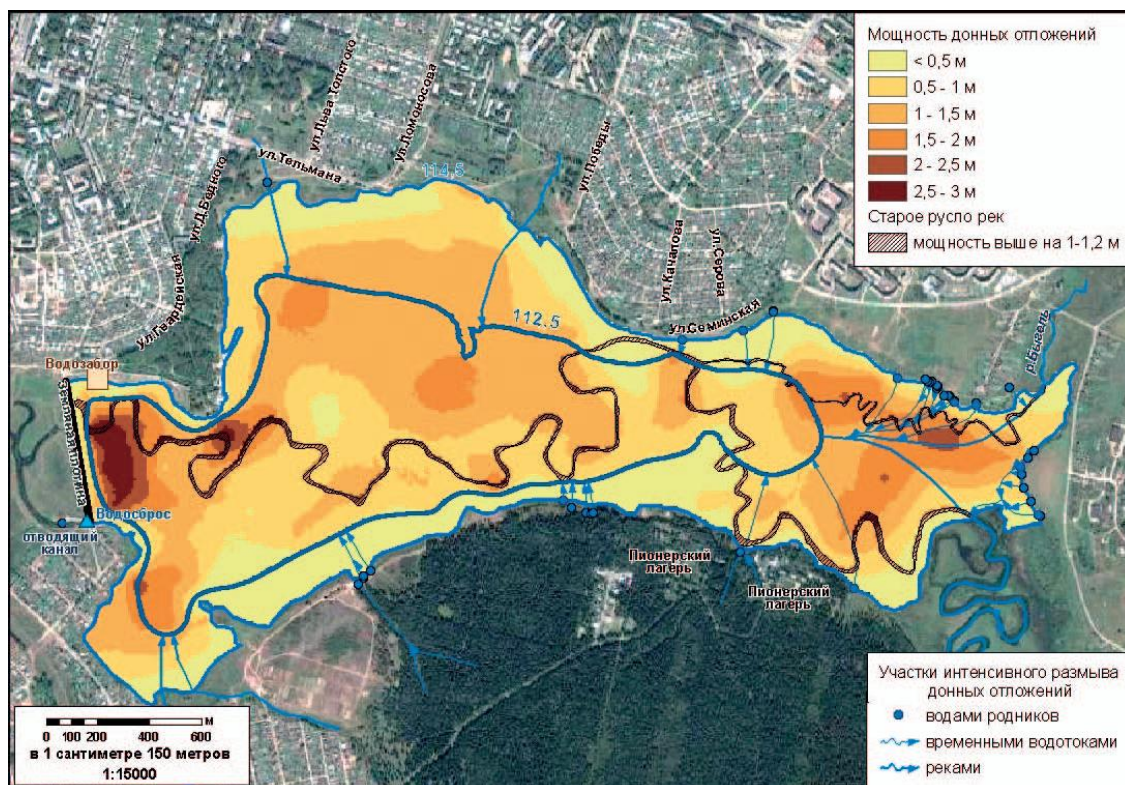


Рис. 4. Карта мощностей донных отложений  
Нижнезырянского водохранилища

По результатам расчетов, общий объем донных отложений, накопленных за время существования водохранилища, составляет 3,5 млн м<sup>3</sup>, из которых 0,14 млн м<sup>3</sup> приходится на затопленную русловую ложбину рек Зырянка и Быгель. Расчетный объем донных отложений, находящихся в пределах предполагаемой зоны осушения при отметке 112,5 м, составляет 1,5 млн м<sup>3</sup> (табл. 2).

Перемещение границы выклинивания подпора в результате частичного спуска водохранилища и смена условий зарегулированного стока на условия

реки в свободном течении приведет к интенсивному размыву толщ накопленных донных отложений и формированию на осушившемся участке дна новых пойменно-русловых форм рельефа, соответствующих новым гидродинамическим условиям.

Таблица 2

Количественные характеристики донных отложений  
Нижнезырянского водохранилища

Показатель		В целом для водохранилища	В пределах предполагаемой зоны осушки
Объем, млн м <sup>3</sup>		3,5	1,5
Мощность, м	Средняя	1,1	0,8
	Максимальная	4,3	3,0
Площадь, га		365,0	193,0

Учитывая типологическую принадлежность объекта и его размещение в границах региона с высоким естественным эрозионным потенциалом, можно ожидать, что на первом этапе ведущую роль будет играть перераспределение донных отложений, оставшихся выше уровня воды. Наибольшего поступления наносов в результате линейного размыва донных отложений следует ожидать в результате эрозионной деятельности рек Зырянка и Быгель.

Наибольшую экологическую опасность обнажающиеся донные отложения будут представлять до их зарастания, то есть до формирования устойчивых сомкнутых растительных ассоциаций, препятствующих развитию дефляционных процессов.

В свою очередь это приведет не только к изменению морфометрических характеристик водохранилища, но и высыхание донных отложений, их воздействию на прилегающие экосистемы в связи с пылением, зарастанию ложа водохранилища и изменениям в наземных экосистемах с разной степенью интенсивности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации рассмотрено математико-картографическое, алгоритмическое и программное обеспечение геоинформационного моделирования пространственно-временных геосистем и комплексов (на примере гидрологических). Математико-картографическое моделирование пространственно-временных геоэкологических процессов и явлений проводилось на основе топографических, гидрографических, гидрометеорологических, экологических и других тематических данных, характерных для территории Уральского Прикамья.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. На основе геоинформационных технологий предложены методики определения и уточнения гидрографических, гидрологических характеристик

рек, их бассейнов, а также морфометрических характеристик водохранилищ. Их основой явилось вычисление пространственных характеристик любого гидрологического объекта или явления. Так например, в пределах любого бассейна появляется возможность расчета линейных и площадных параметров объектов, причем, как суммарных значений, например, длины рек или площади, занятой озерами, так и с вычислением показателей каждого объекта и его доли от общего суммарного значения, что очень важно для исследований и расчетов речного стока, особенно по неизученным рекам.

Следующей важной функциональной особенностью созданной ГИС является возможность выделения глубоководной, мелководной и прибрежной зон и подзон в пределах какого-либо участка водохранилища и расчет их морфометрических характеристики. Определение этих таксонов выполняется по заданным пользователем критериям в виде значений глубин на их границах с последующим созданием векторных и растровых слоев, по которым вычисляются площади и пространственная статистика.

2. Разработаны методы математико-картографического моделирования для решения геоэкологических задач, связанных с формированием поверхностного стока с учетом неоднородности информации о территории водосбора. С их помощью возможно не только создание карт распределения гидрологических процессов и явлений, построение изолиний с заданным шагом, но и выполнение пространственного корреляционного и регрессионного анализов. Предложено использование обобщенного интегрального показателя для оценки неоднородности формирования поверхностного стока, что дало возможность комплексного учета и степени влияния каждого фактора.

3. На основе непараметрического вероятностно-статистического подхода разработаны новые математико-картографические модели качественных изменений водохранилищ при их сработке (в том числе не линейной). Проведенное моделирование позволяет оценить непараметрические функции распределения глубин и их параметры, а также строить графики функций распределения глубин. По этим результатам возможна классификация участков водохранилища в зависимости от изменения их морфометрических особенностей при понижении уровня воды. Эти изменения возникают из-за уменьшения площадей участков водохранилища покрытых водой, а также возможного появления отдельных замкнутых котловин (ям), не связанных с основной частью водохранилища.

4. Созданы алгоритмы геостатистического моделирования процесса сработки и обнаружения качественных изменений состояния водохранилищ на заданную величину, а также проведена оценка влияние сработки водохранилищ на условия зимовки и воспроизводства гидробионтов. Впервые для условий камских водохранилищ проведен расчет всех замкнутых котловин, образующихся в результате зимней сработки, где высока вероятность развития заморных явлений. Анализ полученных данных показывает, что на Камском водохранилище масштабы рассматриваемых явлений достаточно велики. Одним из вариантов решения проблемы является изменение в регламенте работы ГЭС. Так, при уменьшении амплитуды зимней сработки Камского во-



дохранилища только на 1,5 м (до уровня 102,5 м. абс), количество ям, а также их суммарные площади и объемы сокращаются практически на 30 %, что существенно улучшит условия зимовки гидробионтов на Камском водохранилище. Другим вариантом решения является прокапывание прорезей. Для условий Воткинского водохранилища эта проблема менее актуальна и объясняется небольшой величиной зимней сработки в связи с положением в каскаде и соответствующим режимом регулирования.

5. Для всех бассейнов рек, на которых когда-либо велись наблюдения за стоком на территории водосбора Воткинского водохранилища, вычислены следующие характеристики: основные гидрографические показатели, площади с разными типами почв, закарстованность водосбора, антропогенная нагрузка на бассейны рек, а также впервые рассчитаны некоторые новые показатели и коэффициенты, определение которых традиционными методами крайне сложно или практически невозможно. При этом они играют далеко не последнюю роль в понимании ряда важнейших гидрологических процессов и явлений и позволяют, особенно при отсутствии данных наблюдений, косвенным путем получить важные гидрологические сведения.

6. Методами геоинформационных технологий проведена оценка мощности накопленных донных отложений и их пространственного распределения. Основой для решения задач, связанных с процессом сработки водоема и определением мощности отложений, послужило создание оптимальной цифровой модели рельефа дна водоема, построенной математико-картографическими методами на основе информации о состоянии территории до и после образования водоема. Для решения проблемы получения формальных выводов о процессе сработки на территории Нижнезырянского водохранилища с учетом понижения его уровня реализован программный инструмент, позволяющий применить определенный статистический подход: моделировать сброс воды в водохранилище на заданный уровень с получением полигонального слоя, содержащего информацию о не осушенных и осушенных областях водохранилища с пространственной оценкой донных отложений.

7. Разработана геоинформационная модель, позволяющая проводить оценку развития неблагоприятной экологической ситуации, вызванной снижением уровня водохранилища. Прогноз изменения экологической ситуации при снижении уровня Нижнезырянского водохранилища, прежде всего, будет связан с изменением морфометрических характеристик водоема, перераспределением иловых отложений по площадям, их высыханием и воздействием образовавшийся пыли на прилегающие экосистемы, а также зарастанием ложа водохранилища и изменением наземных экосистем. После предполагаемого спуска воды в Нижнезырянском водохранилище ожидается увеличение площади мелководных зон (глубина менее 2 м) и начнется интенсивный снос осушенных донных отложений в оставшуюся часть водохранилища, что приведет к его обмелению и расширению мелководной зоны, а также к интенсивному размыву толщ накопленных донных отложений и формированию на осушившемся участке дна новых пойменно-руслowych форм рельефа, соот-

ветствующих новым гидродинамическим условиям. Одновременно с эрозийным размывом на участке осушения неизбежно развитие дефляционных процессов, чему будет способствовать высыхание обнажающегося слоя донных отложений. Максимальный уровень пыления ожидается на втором этапе развития последствий сброса вод – обнажения поверхности отложений при отсутствии фитопродуцирования, т. е. в период, когда их поверхность просохнет до состояния пыления, но еще не будет покрыта растительностью. Процесс зарастания обнажающейся донной поверхности протекает с различной степенью интенсивности в зависимости от эдафического состояния грунтов, их пригодности для роста и развития зональных видов растительности. Однако формирующиеся наземные экосистемы недостаточно эффективны для стабилизации экологической обстановки в охранной зоне водохранилища, требующий коренной реконструкции, направленной на повышение фитопродукционных и водоохранно-защитных свойств.

### **Публикации по теме диссертации**

#### *Монографии*

1. Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях // Пермь. Алекс-Пресс. 2010. 217 с. (соавтор Калинин В.Г.)
2. ГИС и математико-картографическое моделирование при исследовании водохранилищ (на примере камских) // Пермь. Алекс-Пресс. 2011. 158 с. (соавтор Калинин В.Г.).
3. Анализ системы водоподпорных гидротехнических сооружений с использованием геоинформационных технологий //Пермь. Пермское книжное издательство. 2011. 208 с. (соавторы Шавнина Ю.Н., Соболева Е.Б., Михайлов А.В., Немтин Г.Н.).
4. Малые водохранилища: экология и безопасность //Пермь. ОАО ИПП «Уральский рабочий». 2012. 256 с. (соавтор Максимович Н.Г.).

#### *Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК*

5. Некоторые аспекты применения геоинформационных технологий в гидрологии // Метеорология и гидрология. 2000. № 12. С. 71–78. (соавтор Калинин В.Г.).
6. Гидрологическая геоинформационная система «Бассейн Воткинского водохранилища» // Метеорология и гидрология. 2002. № 5. С. 95–100. (соавтор Калинин В.Г.).
7. Использование гидрографических характеристик рек и их бассейнов в гидрологических расчетах // Метеорология и гидрология. 2002. № 11. С. 75–80. (соавтор Калинин В.Г.).

8. К вопросу о влиянии рельефа на сток рек Воткинского водохранилища // Метеорология и гидрология. 2004. № 3. С. 98–104. (соавтор Калинин В.Г.).

9. Изучение оползневой деятельности на берегах Камского водохранилища с применением ГИС-технологий // Геоморфология. М.: Изд-во «Наука». 2004. Вып. 4. С. 55–62. (соавторы Назаров Н.Н., Смиренов С.А., Тюняткин Д.Г.).

10. Моделирование объема сработки водохранилища и расчет мощности донных отложений // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2007. № 10. (соавторы Шавнина Ю.Н., Максимович Н.Г.).

11. Методологические аспекты пространственного анализа формирования стока рек с использованием математико-картографического моделирования // Метеорология и гидрология. № 1. 2009. С. 85–90. (соавтор Калинин В.Г.).

12. Технология комплексной оценки фитомассы сельскохозяйственных культур по данным дистанционного зондирования Земли. Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле. 2010. Выпуск 4. Ижевск. С. 3–10. (соавторы Калинин Н.А., Свизов Е.М., Смирнова А.А.).

13. Оценка мощности и экологических характеристик донных отложений водохранилища с помощью геоинформационного моделирования // Инженерные изыскания. 2011. № 1. С. 32–38. (соавторы Максимович Н.Г., Ворончихина Е.А., Первова М.С., Шавнина Ю.Н.).

14. Математико-картографическое моделирование процессов снеготаяния // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5; URL: <http://www.science-education.ru/105-7156>. (соавторы Шавнина Ю.Н., Шихов А.Н.).

15. Комплексный подход в исследовании динамики процессов снеготаяния на водосборах рек // Вестник УдГУ, сер. Биология, Науки о Земле. 2012, № 4, С. 136–145. (соавторы Шавнина Ю.Н., Шихов А.Н.).

16. Пьянков С.В. Разработка принципов и создание единой геоинформационной системы геологической среды г. Перми (Инженерная геология и геоэкология) // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6; URL: <http://www.science-education.ru/106-7893> (дата обращения: 25.12.2012). 8 с. (соавторы Коноплев А.В., Копылов И.С., Наумов В.А., Ибламинов Р.Г.).

17. Пьянков С.В. Оптимизация интегрального показателя формирования зимнего стока // Метеорология и гидрология. 2013. (Принято в печать). (соавтор Калинин В.Г.).

#### *Статьи в журналах и научных сборниках*

18. Использование геоинформационных систем для определения гидрографических характеристик водных объектов // Гидрология Урала на рубеже веков: Тезисы докладов науч. - практич. конф. / Перм. ун-т. Пермь, 1999. С. 22–23. (соавтор Калинин В.Г.).

19. К вопросу о точности выполнения картометрических работ традиционными способами и с применением ГИС-технологий // Вопросы физической географии и геоэкологии Урала: Межвуз. сб. науч. тр./ Перм. ун-т. Пермь, 2000. С. 50–54 (соавтор Калинин В.Г.).

20. О точности определения морфометрических характеристик водохранилищ // Вопросы физической географии и геоэкологии Урала: Межвуз. сб. науч. тр./ Перм. ун-т. Пермь, 2002. С. 121–125. (соавтор Калинин В.Г.).

21. Геоинформационные технологии в гидрологических исследованиях // Тез. докл. VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 1. Состояние и перспективы развития систем гидрологических наблюдений и информационное обеспечение потребителей. СПб. Гидрометеиздат, 2004. С. 69–71 (соавтор Калинин В.Г.).

22. Гидрологическая ГИС водохранилищ (на примере камского каскада) // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований, полученные за 2004 г. Аннотационные отчеты. Пермь; Екатеринбург: УрО РАН, 2005. С. 270–273. (соавторы Матарзин Ю.М., Калинин В.Г., Мацкевич И.К.).

23. Исследование гидрологического режима крупных водохранилищ с использованием геоинформационных технологий (на примере камских) // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований, полученные за 2005 г. Аннотационные отчеты. Пермь; Екатеринбург: УрО РАН, 2006. С. 240–243. (соавторы Калинин В.Г., Мацкевич И.К., Микова К.Д.).

24. Гидрологическая ГИС водохранилищ (на примере камского каскада) // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Результаты научных исследований, полученные за 2005 г. Аннотационные отчеты. Пермь: ПНЦ УрО РАН, 2006. С. 271–275. (соавторы Мацкевич И.К., Калинин В.Г.).

25. Гидрологическая ГИС водохранилищ и особенности ее структуры // Современные географические исследования: сб. тр. ученых геогр. фак-та, посвящ. 90-летию Перм. гос. ун-та / Перм. ун-т. – Пермь, 2006. С. 143–150. (соавтор Калинин В.Г.).

26. Использование геоинформационных технологий в области охраны окружающей среды // Состояние и охрана окружающей среды в Пермском крае за 2007 г. Пермь, 2008. С. 264–266. (соавтор Шавнина Ю.Н.).

27. Исследование гидрологического режима крупных водохранилищ с использованием геоинформационных технологий (на примере камских) // Региональный конкурс РФФИ-Урал. Научно-практические итоги региональных конкурсов РФФИ-Урал в Пермском крае за 2004–2006 гг. Аннотационные отчеты. Пермь: ПНЦ УрО РАН, 2007. С. 255–259. (соавторы Калинин В.Г., Мацкевич И.К., Микова К.Д.).

28. Гидрологическая ГИС водохранилищ (на примере камского каскада) // Научно-практические итоги региональных конкурсов РФФИ-Урал в Пермском крае за 2004–2006 гг. Аннотационные отчеты. Пермь: ПНЦ УрО РАН, 2007. С. 289–292. (соавторы Мацкевич И.К., Калинин В.Г.).

29. Геоинформационная система «Гидротехнические сооружения Пермского края» как пример реестра водных объектов // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации, Москва, 2008. (соавтор Шавнина Ю.Н.).

30. Региональная гидрологическая ГИС «Бассейн Воткинского водохранилища» // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. № 2010620078. 1 февраля 2010 г. (соавтор Калинин В.Г.).

31. Гидрологическая ГИС «Водохранилища камского каскада» // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. № 2010620079. 1 февраля 2010 г. (соавтор Калинин В.Г.).

32. Геоинформационная система «Гидротехнические сооружения Пермского края» (ГИС ГТС «Пермского края») // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. № 2011620638. (соавтор Шавнина Ю.Н.).

### *Материалы конференций*

33. Некоторые аспекты комплексной оценки экологической ситуации. Тез. конф. «Безопасность биосферы». Свердловск. 1–3 декабря 1998. С. 125. (соавторы Колегова Н.В., Денисова М.О.).

34. Эколого-геоинформационная система как элемент управления экологической ситуацией в городской агломерации. Тез. конф. «Безопасность биосферы – 98». Свердловск. 1–3 декабря 1998. С. 108. (соавторы Резвых В.В., Тарбаев Д.Д., Карзенкова А.В.).

35. Методика построения обобщенных интегральных показателей для информационного обеспечения экологического мониторинга и управления природопользованием // Тез. конф. «Распознавание образов и анализ изображений». Новосибирск. 11–18 октября. 1998 г. С. 111–114. (соавторы Абусев Р.А., Колегова Н.В., Денисова М.О.).

36. Использование геоинформационных технологий для информационной поддержки принятия управленческих решений // Тез. конф. «Эколого-экономическая конференция Коми-Пермяцкого автономного округа». Кудымкар. 1999. (соавторы Михалев В.В., Коноплев А.В.).

37. ГИС-технологии в изучении экзогенных геологических процессов // География, общество, окружающая среда: развитие географии в странах Центральной и Восточной Европы: Тез. докл. Ч. 2. Калининград: Изд-во КГУ, 2001. С. 55–56. (соавторы Калинин В.Г., Назаров Н.Н., Симиринов С.А., Анисимов В.М., Тюняткин Д.Г.).

38. О новых подходах в определении гидрографических характеристик и их роль в расчетах стока // Научная конференция по результатам исследований в области гидрометеорологии и мониторинга загрязнения природной среды в государствах-участниках СНГ, посвященная 10-летию образования Межгосударственного совета по гидрометеорологии: Тез. докл. Секция 2. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. С. 101–102 (соавтор Калинин В.Г.).

39. Опыт создания цифровой модели дна водохранилища (на примере Камского) // Материалы междунар. конф. «ИнтерКарто-ИнтерГИС – 8»: ГИС для устойчивого развития территорий. Хельсинки – Санкт-Петербург, 28 мая – 1 июня 2002. С. 229–231. (соавтор Калинин В.Г.).

40. О создании гидрологической ГИС «Водохранилища камского каскада» // География и регион. VII. География и экологическое образование в школе и вузе. VIII. Картография и геоинформатика: Материалы Междунар. науч.- практ. конф. (30 сент.– 4 окт. 2002 г., г.Пермь) / Перм. ун-т. Пермь, 2002. С. 151–154. (соавтор Калинин В.Г.).

41. Особенности информационной обработки и анализа данных в гидрологической ГИС // Тез. докл. XI Всероссийского форума «Рынок геоинформатики России. Современное состояние и перспективы развития». – М.: ГИС-Ассоциация, 8-10 июня 2004. С. 59–60. (соавтор Калинин В.Г.).

42. Применение ГИС-технологий для изучения оползневых процессов на берегах водохранилищ // Материалы междунар. конф. «ИнтерКарто-ИнтерГИС – 10»: ГИС для устойчивого развития территорий. Владивосток, Чанчунь (КНР), 12–19 июля 2004. С. 536–539. (соавторы Калинин В.Г., Назаров Н.Н.).

43. Особенности формирования зоны осушки на Камском водохранилище в процессе зимней сработки // Материалы Всероссийской науч.-практ. конф. «Современные проблемы исследований водохранилищ». Пермь. 2005. С. 157–162. (соавторы Калинин В.Г., Гареев Р.Р.).

44. О расчете морфометрических характеристик зоны переменного подпора на Камском водохранилище с применением ГИС-технологий // Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов: Материалы научной конференции. – Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2005. С. 85–88. (соавтор Калинин В.Г.).

45. ГИС «Гидротехнические сооружения Пермского края» для принятия управленческих решений по обеспечению безопасности населения от вредного воздействия вод // ГЕО-Сибирь-2006. Т.1. Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия. Ч.1: сб. материалов междунар. научн. конгресса «ГеоСибирь-2006», 24–26 апреля 2006 г. Новосибирск: СГГА, 2006. С. 156–158. (соавторы Соболева Е.Б., Шавнина Ю.Н.).

46. Разработка программного модуля для расчета характеристик рек и их водосборов в гидрологической ГИС «Бассейн Воткинского водохранилища» // Материалы Всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Водохозяйственные проблемы и рациональное природопользование». Ч. 1: Водохозяйственные проблемы. Оренбург. ун-т; Перм. ун-т. Оренбург – Пермь. С. 172–175. (соавтор Калинин В.Г.).

47. Обработка данных с непрерывными пространственными характеристиками в гидрологической ГИС «Бассейн Воткинского водохранилища» // Материалы междунар. конф. «ИнтерКарто-ИнтерГИС – 14»: Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт: материалы междунар. конф. Саратов – Урумчи (КНР), 2008, С. 62–65. (соавтор Калинин В.Г.).

48. Пространственно-временной анализ системы гидротехнических сооружений с помощью ГИС // Материалы междунар. конф. «ИнтерКарто-ИнтерГИС – 13»: Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт. Ханты-Мансийск, Йеллоунайф 12-14 августа 2007 г. – Ханты-Мансийск: Полиграфист, 2007. Т. 1. С. 141–145. (соавтор Шавнина Ю.Н.).

49. Реестр водохозяйственных объектов на примере ГИС «Гидротехнические сооружения Пермского края» // Геоинформационный портал ГИС-Ассоциации – 12-я Всероссийская учебно-практическая конференция «Организация, технологии и опыт ведения кадастровых работ», Москва, 13–15 ноября 2007 г. [http://www.gisa.ru/kadastr\\_07.html](http://www.gisa.ru/kadastr_07.html) (соавтор Шавнина Ю.Н.).

50. Оценка экологических последствий снижения уровня водохранилища с использованием геоинформационного моделирования // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в РФ: Труды Третьей Общероссийской Конференции. М. 2007. (соавтор Шавнина Ю.Н., Максимович Н.Г.).

51. Геоинформационные технологии в гидрологических исследованиях // Доклады VI Всеросс. гидрол. съезда 28 сентября – 1 октября 2004 г. СПб. Секция 1. Состояние и перспективы развития систем гидрологических наблюдений и информационное обеспечение потребителей. 2006. С. 136–140. (соавтор Калинин В.Г.).

52. Гидрологическая ГИС водохранилищ: назначение, структура, особенности функционирования // Труды межрег. конференции «Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края», Пермь, 2008. С. 5–16. (соавтор Калинин В.Г.).

53. Геопортал Пермского края как механизм реализации инфраструктуры пространственных данных // Труды межрег. конференции «Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края», Пермь, 2008. С. 107–110.

54. Геоинформационное моделирование водохранилища при изменении уровня воды // Материалы междунар. конф. «ИнтерКарто-ИнтерГИС – 15»: Пермь (Россия), Гент (Бельгия). 2009. Т. 2. С. 331–343. (соавторы П.Н. Сапожников, Калинин В.Г.).

55. Method of Complex Evaluation of Crop Biomass // Proceeding of the 15<sup>th</sup> international Conference InterCart-InterGIS. Part II – Gent, 2009. P. 231–240. (соавторы N.A. Kalinin, E.M. Sviyazov, A.A. Smirnova, I.B. Nekrasov).

56. Развитие региональной инфраструктуры пространственных данных (РИПД) для устойчивого развития Пермского края // Труды II межрег. конференции «Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края», Пермь, 2009. С. 5–29. (соавтор Щербинин Ю.Б.).

57. Технология комплексной оценки фитомассы сельскохозяйственных культур // Материалы междунар. конф. «ИнтерКарто-ИнтерГИС – 15». Пермь (Россия) – Гент (Бельгия). 2009. Т.1. С. 81–86. (соавторы Калинин Н.А., Свиязов Е.М., Смирнова А.А., Некрасов И.Б.).

58. Использование обобщенного интегрального показателя при исследовании пространственного распределения зимнего стока рек. Материалы

междунар. конф. «ИнтерКарто-ИнтерГИС – 16»: Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт. Ростов-на Дону (Россия) – Зальцбург (Австрия), 3 – 4 июля 2010 г. С.457–462. (соавтор Калинин В.Г.).

59. Современное состояние региональной инфраструктуры пространственных данных Пермского края // Труды III межрег. конференции «Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края», Пермь, 2010. С. 5–8.

60. Прогнозирование процессов снеготаяния с помощью клеточных автоматов // Труды IV межрег. конференции «Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края», Пермь, 2011. С. 10–12.



## СОДЕРЖАНИЕ

### ВВЕДЕНИЕ

1. ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО РЕШЕНИЯ ТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ
  - 1.1. Основные термины и определения
  - 1.2. Математико-картографическое моделирование и функциональные возможности региональных гидрологических ГИС
  - 1.3. Методы и способы обработки данных с непрерывной пространственной характеристикой
2. ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ И МЕТОДОВ МАТЕМАТИКО-КАРТОГРАФИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА
  - 2.1. Использование гидрографических характеристик рек и их бассейнов в расчетах стока
  - 2.2. Методологические аспекты пространственного анализа формирования стока рек с использованием математико-картографического моделирования
  - 2.3. Разработка обобщенного интегрального показателя для оценки комплексного влияния основных факторов формирования зимнего стока
3. ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УРОВНЯ ВОДЫ
  - 3.1. Математико-картографическое моделирование качественных изменений водохранилища
    - 3.1.1. Построение математической модели выявления качественных изменений водохранилища при понижении уровня воды
    - 3.1.2. Вычисление функций распределения и их моментов
    - 3.1.3. Оценка функций распределения и их параметров
    - 3.1.4. Оценка параметров разности глубин
    - 3.1.5. Характеризация качественных изменений водохранилища при понижении уровня воды
    - 3.1.6. Оценка неизвестных параметров ( $\mu$ ,  $\sigma$ )
    - 3.1.7. Оценивание параметров разности глубин
  - 3.2. Алгоритмы математико-картографического моделирования состояния водохранилища при сработке на заданную величину
    - 3.2.1. Алгоритм выделения точек, попавших в особую область
    - 3.2.2. Алгоритм геостатистического моделирования процесса сработки и обнаружения качественных изменений состояния водохранилища

- 3.3. Результаты моделирования сработки водохранилища
- 3.4. Влияние сработки водохранилищ на условия зимовки и воспроизводства гидробионтов
- 4. ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ ПРИ СНИЖЕНИИ УРОВНЯ ВОДОХРАНИЛИЩА
  - 4.1. Возможные экологические последствия при снижении уровня водохранилища
  - 4.2. Некоторые проблемы эксплуатации малых водохранилищ на территории Пермского края
    - 4.2.1. Накопление донных отложений
    - 4.2.2. Общая характеристика объекта исследования
  - 4.3. Математико-картографическое моделирование последствий снижения и оценка пространственного распределения мощности донных отложений
    - 4.3.1. Выбор метода построения цифровой модели рельефа дна водохранилища
    - 4.3.2. Алгоритм процесса сработки и оценка мощности донных отложений
  - 4.4. Результаты математико-картографического моделирования и прогноз возможных геоэкологических последствий
    - 4.4.1. Мощность накопленных донных отложений и их распределение по площади
    - 4.4.2. Прогноз изменения экологической ситуации при снижении уровня Нижнезырянского водохранилища
      - 4.4.2.1. Морфометрические характеристики
      - 4.4.2.2. Перераспределение отложений по площадям
      - 4.4.2.3. Высыхание донных отложений и воздействие на прилегающие экосистемы в связи с пылением
      - 4.4.2.4. Оценка возможности зарастания ложа водохранилища и изменений в наземных экосистемах

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

ПРИЛОЖЕНИЕ